

Підвищення точності вимірювання теплопровідності рідин методом прямого підігріву термістора

С. М. Матвієнко, С. П. Вислоух, О. А. Мартинчук

Створено прилад для вимірювання теплопровідності рідин, принцип дії якого базується на методі прямого підігріву термістора. Надані результати експериментальних досліджень з використанням контрольних рідин за допомогою створеного приладу. Результати показали високу точність та ефективність використання приладу при визначенні теплопровідності рідин. Необхідна точність досягається за рахунок збільшення сеансу вимірювання з наступною обробкою їх результатів

Ключові слова: теплопровідність матеріалів, термістор, прямий підігрів термістора, прилад для визначення теплопровідності

1. Вступ

В сучасному світі науки, техніки та промисловості досить гостро стоїть питання енергозбереження та енергоефективності. Тому останнім часом з'являються новітні розробки та інноваційні проекти, що пов'язані з впровадженням нових ефективних технологій в різноманітних сферах виробництва. В рамках впровадження таких технологій використовуються нові матеріали та рідини, які мають особливі теплоізоляційні та теплопровідні характеристики. Проводяться розробки нових інноваційних охолоджуючих рідин для систем охолодження теплоенергетичних пристроїв на основі двофазних систем, що складаються з базового середовища (вода) і наночастинок [1], створюються нові рідкі полімерні матеріали, які мають підвищені теплоізоляційні та теплопровідні властивості в порівнянні з зазвичай використовуваними матеріалами.

В харчовій промисловості при розрахунках холодильного обладнання важливо знати теплофізичні характеристики (ТФХ) харчових продуктів [2, 3]. Кількість і номенклатура продуктів з року в рік зростає, а відсутність або використання ненадійних ТФХ продуктів ускладнює виконання інженерних розрахунків, тягне за собою при виконанні проектних робіт до неточностей в оцінці продуктивності технологічного обладнання харчових виробництв. Це, в свою чергу, стає причиною порушень параметрів виробничого процесу і додаткових не виправданих витрат, в тому числі наднормативних витрат електроенергії, підвищення собівартості та зниження якості продукції [3].

Важливими є дослідження ТФХ біологічних матеріалів в біології та медицині. Так за ТФХ визначається наявність та ступінь імунологічної реакції на алерген [4, 5].

Одна з першочергових задач техніки теплофізичних досліджень – це підвищення їх продуктивності. Тільки ефективні методи вимірювання, які засновані на фундаментальних метрологічних підходах, дозволяють отримувати дос-

товірні результати і можуть бути застосовні по відношенню до того широкого спектру нових речовин і розчинів органічних рідин, які щодня виробляються і синтезуються як у вітчизняній, так і світової промисловості.

Номенклатура приладів для вимірювання теплофізичних характеристик рідин, які випускаються промисловістю, вкрай мала, а їх вартість досить значна, тому в більшості випадків застосовуються лабораторні вимірювальні установки індивідуального виготовлення, а не промислові прилади.

Актуальним є створення приладу, завдяки якому значно спрощується процес вимірювання теплопровідності матеріалів неруйнівним методом та дає можливість одночасного вимірювання великої кількості дослідних зразків з підвищеною продуктивністю та точністю вимірювання.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На сьогодні дослідження теплопровідності рідин виконуються в широкому діапазоні температур в нерухомому стані та при ламінарному русі рідини. При проведенні досліджень використовують дві групи методів: стаціонарні і нестаціонарні. Стаціонарні методи, засновані на дослідженні незмінних в часі температурних полів, як правило, більш прості в застосуванні в порівнянні з нестаціонарними [3, 6].

Нестаціонарні методи засновані на дослідженні мінливих в часі за певним законом температурних полів. Вони більш складні в реалізації. Основна складність полягає в тому, що в експерименті складно реалізувати умови, закладені в теорії методу [3, 7].

Для вимірювання теплопровідності рідин і газів використовуються такі методи, які застосовуються також для твердих тіл [1, 6, 7]: метод плоского шару, метод коаксіальних циліндрів, метод теплових хвиль, метод лазерного спалаху, метод нагрітої нитки та метод прямого підігріву.

Особливістю реалізації методу плоского шару для дослідження рідин є контроль появи конвекції в досліджуваному шарі [1, 6, 7].

В методі коаксіальних циліндрів [1] досліджувана речовина заповнює циліндричний зазор, що утворений двома коаксіально розташованими циліндрами. У внутрішньому циліндрі розміщується основний нагрівач. Робоча різниця температур вимірюється термопарами.

Метод теплових хвиль полягає в збудженні теплових хвиль одночасно в дослідному та в еталонному зразках при вимірюванні їх характеристик та подальшому їх порівнянню. Так, в роботі [8] розглядаються вимірювальні установки, що реалізують метод температурних хвиль (метод регулярного режиму) за допомогою лазерного випромінювання і електронного потоку.

Метод лазерного спалаху [9] (метод лазерного імпульсу) відноситься до групи нестаціонарних методів, які, на відміну від стаціонарних, не вимагають тривалого часу для встановлення теплової рівноваги. Суть методу лазерного спалаху полягає в тому, що короткий імпульс променевої енергії поглинається в тонкому шарі фронтальної поверхні зразка.

В методі нагрітої нитки [1] внутрішній циліндр замінюється нагрітим дротом (ниткою), що є одночасно джерелом теплоти і термометром опору для вимірювання температури.

Метод прямого підігріву по своїй суті аналогічний методу нагрітої нитки, але з тією відмінністю, що в першому випадку чутливим елементом є платинова нитка, а в другому – термістор. Метод прямого підігріву термістора має ряд переваг перед іншими методами. Сутність методу полягає в використанні ділянки вольт-амперної характеристики термістора, де його опір при збільшенні струму зменшується (для термісторів з негативним коефіцієнтом залежності опору від температури), а напруга на ньому падає. На цій ділянці величина падіння опору буде залежати від температури його розігріву, тобто від навколишнього середовища, в якому він знаходиться.

Дані методи визначення ТВХ рідин та матеріалів лежать в основі досліджень величини перфузії (пропускання розчинів і біологічно активних речовин через судинну систему органів і тканин організму людини) за допомогою термісторів [10], вимірювання теплопровідності рідин і порошків, використовуючи термісторний зонд [11], а також визначення теплових імпульсів за допомогою термісторних зондів [12].

На сьогодні для вимірювання теплопровідності рідин та матеріалів використовують установки, що виробляються в одиничних екземплярах, тобто не існує промислового виробництва для таких приладів (ITC-1-1, ITC-c-2, ITC-1c-3, ITC-c-4, ITC-c-5, ITC-q-6, Режим 1, KD2-PRO, DTC-25, DTC-300, LAMBDA, Thermal Constant Analyzer, C-Therm TCi, XFA-300, LFA 467 HyperFlash, FLASHLINE-3000/5000, THW-L1, TLS 100, THB-100). Більшість підприємств та наукових установ використовує прилади власної розробки.

На основі аналізу методів вимірювання ТФХ параметрів рідин та матеріалів можна стверджувати, що існуючі методи вимірювання теплофізичних властивостей мають різні недоліки.

1. При використанні стаціонарного методу вимірювання характерними недоліками є тривалий час вимірювання і громіздкість тепловимірювальних систем.

2. Існуючі нестаціонарні методи хоча і мають високою швидкістю, але також такі недоліки:

- в методі лазерного та ксенонового спалаху вимагаються підвищені вимоги до умов експерименту окрім того при вимірюванні теплопровідності рідин, багато із яких прозорі частина світлової енергії не поглинається рідиною, що приводить до похибки визначення ТФХ. Слід зауважити, що прилади, які використовують ці методи, досить складні і їх вартість досить значна;

- метод монотонного нагріву потребує тривалого процесу градування;

- практичне втілення більшості методів потребує громіздкого обладнання, що унеможливає одночасне вимірювання великої кількості дослідних зразків.

Метод прямого підігріву термістора завдяки невеликим розмірам зонду та простій конструкції приладу може широко використовуватися в різних галузях промисловості, медицині та біології для визначення ТФХ різних матеріалів при невеликій вартості обладнання.

Проведено аналіз існуючих промислових та лабораторних приладів [13–15]. Можна зробити висновок, що прилади для визначення теплофізичних характеристик матеріалів мають великі похибки вимірювання, що перевищують 3 % та характеризуються великою тривалістю вимірювань. Відсутні промислові прилади, які здатні за короткий час вимірювати теплофізичні характеристики великої кількості різноманітних матеріалів. Даний факт зумовлює загальну необхідність створення ефективних методів вимірювання теплопровідності рідин та матеріалів з метою визначення їх теплофізичних властивостей. Необхідність контролю матеріалів на всіх етапах виробництва зумовлює пошук та вдосконалення засобів неруйнівного контролю теплопровідності матеріалів.

3. Ціль та завдання досліджень

Метою роботи є розробка засобу вимірювання теплопровідності рідин, що базується на методі прямого підігріву термістора.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- виконати аналіз існуючих методів та приладів для вимірювання теплофізичних характеристик матеріалів, що використовують метод прямого підігріву термістора;
- розробити математичну модель визначення теплопровідності рідин з застосуванням вибраного методу;
- розробити прилад для вимірювання теплопровідності рідин за методом прямого підігріву термістора для використання в промислових умовах, що має підвищену точність та дозволяє одночасно проводити вимірювання ТФХ великої кількості досліджуваних матеріалів, підвищуючи таким чином продуктивність вимірювань;
- виконати експериментальні дослідження з використанням створеного приладу з метою визначення метрологічних його характеристик та розробити практичні рекомендації з впровадження запропонованого методу та приладу для визначення теплопровідності рідин і матеріалів.

4. Матеріали і методи досліджень вимірювання теплопровідності рідин методом прямого підігріву термістора

Для вирішення поставленого завдання запропоновано в основі створюваного приладу для визначення ТФХ використати метод нагрітої нитки.

В промисловості використовують, як правило, термопари або резистивні термоперетворювачі, що виконані у вигляді закінчених пристроїв. Непридатність цих термочутливих елементів для загального використання пояснюється високою вартістю матеріалів, що використовуються, та неможливістю віддаленого контролю внаслідок порівняно малих значень вихідних параметрів, які в значній мірі чутливі до впливу на них зовнішніх факторів. Часто застосовуються датчики інтегральної конструкції, що мають низьку нелінійність вихідної характеристики від температури і достатньо малу вартість, але саме інтегральна конструкція є «ахіллесовою п'ятою» таких елементів, зважаючи на обмеженість робочого температурного діапазону [16].

Термістор, на відміну від наведених термоперетворювачів, має достатньо широкий діапазон робочих температур, можливість віддаленого моніторингу та відносно малі розміри датчика [16].

Одним із ефективних методів вимірювання ТФХ матеріалів є метод прямого підігріву термістора.

Визначення ТФХ речовин методом прямого підігріву термістора, що розташовується в досліджуваній рідині, базується на вимірюванні температури саморозігріву термістора під дією імпульсу струму.

Для пояснення принципу дії методу вимірювання теплопровідності, заснованого на прямому підігріві термістора, на рис. 1 наведено вольт-амперну характеристику термістора [17].

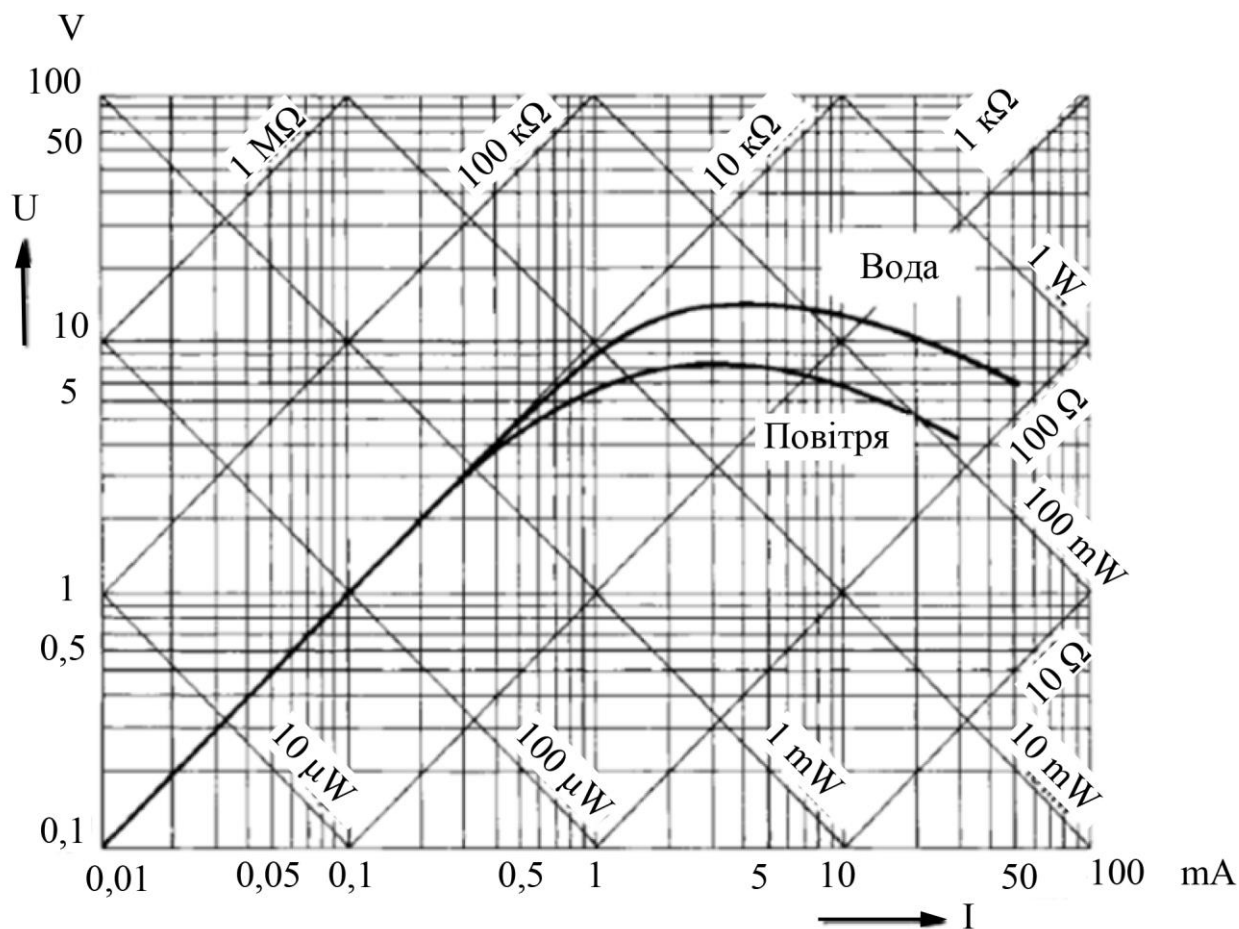


Рис. 1. Вольт-амперна характеристика термістора при постійній температурі [17]

При постійній температурі навколишнього середовища [18] вольт-амперна характеристика термістора має три ділянки.

1. Ділянка прямого підвищення, де електрична потужність термістора не приводить до значного його саморозігріву. Напруга і струм на цій ділянці відповідають закону Ома. Опір термістора визначається температурою навколишнього середовища. На цій ділянці термістори використовуються як датчики температури ($R=dV/dI=const$).

2. Ділянка нелінійного підвищення до максимальної напруги, де опір починає знижуватися. При максимальній напрузі відносне зменшення опору $\Delta R/R$ в наслідок саморозігріву дорівнює відносному збільшенню струму $\Delta I/I$ ($R > dV/dI \geq 0$).

3. Ділянка падіння напруги, де зменшення опору більше ніж відносне збільшення струму. Ця ділянка використовується для вимірювання ТФХ рідин в методі прямого підігріву термістора. Тут проявляється ефект саморозігріву термістора. На цій ділянці ($dV/dI \leq 0$).

Із вольт-амперної характеристики термістора (рис. 1) видно, що на неї впливає не тільки опір $R(T)$, а і коефіцієнт теплопровідності навколишнього середовища. Він залежить від розмірів, форми і виводів термістора. На рис. 1 наведено вольт-амперні характеристики термістора, який розташований в різних середовищах:

- в воді – верхня крива;
- на повітрі – нижня крива.

Крива V/I матеріалу, що має більшу теплопровідність, буде знаходитись вище кривих інших матеріалів з меншою теплопровідністю. При розташуванні термістора в вакуумі його вольт-амперна характеристика буде розташована нижче. Таким чином, за отриманою вольт-амперною характеристикою можна визначити ТФХ середовища, в якому розташований термістор. Цей характер залежності V/I термістора використовується в методі його прямого підігріву для визначення ТФХ досліджуваних рідин.

Аналогічний метод визначення ТФХ речовин застосовується також при вимірюванні методом нагрітої нитки [19], але термісторний зонд має значно менші габаритні розміри (діаметр термістора може бути менше 0,3 мм) і є більш простим за конструкцією. Незважаючи на конструктивні переваги, термістор має нелінійну характеристику залежності свого опору від температури та теплову інерційність за рахунок наявності захисної оболонки, що може привести до похибки при визначенні ТФХ досліджуваних рідин.

Цей метод є ефективним для створення простого багатозондового приладу, який дозволяє проводити одночасно вимірювання ТФХ десятків досліджуваних зразків з великою точністю, а проблеми, що пов'язані з нелінійністю характеристики залежності опору термістора від температури та тепловою інерційністю в розробленому приладі, вирішуються апроксимацією характеристики та вибором оптимального режиму розігріву.

4. 1. Опис функціональної моделі розробленого приладу

На цій основі створено прилад для вимірювання теплопровідності матеріалів, функціональна схема якого наведена на рис. 2.

Прилад має наступні основні вузли:

- шість вимірювальних блоків (ВБ), конструктивно об'єднаних в один вимірювальний модуль (ВМ);
- блок керування приладом (БК);
- термостат, в який встановлюється контейнер з дослідними зразками;
- блок живлення приладу (БК) з зовнішнім джерелом безперебійного живлення (ДБЖ).

Кожний із шести вимірювальних блоків має по 10 вимірювальних зондів, які занурюються в досліджувану рідину. Вимірювальний зонд має конічну форму з термістором на вістрі. Він ввімкнений в одне із плечей вимірювального мосту, сигнал розбалансу якого підсилюється диференційним (інструментальним) підсилювачем і подається через мультиплексор на 12-ти розрядний аналого-цифровий перетворювач. Числові значення розбалансу всіх 10-ти вимірювальних мостів з виходу АЦП по черзі запам'ятовується мікроконтролером вимірювального блоку.

Живлення вимірювального мосту здійснюється від джерела опорної напруги постійного струму $+12\text{ В} \pm 2\%$. Значення напруги вибрано таким чином, щоб забезпечити роботу термістора на ділянці падіння напруги вольт-амперної характеристики, де зменшення опору більше ніж відносне збільшення струму.

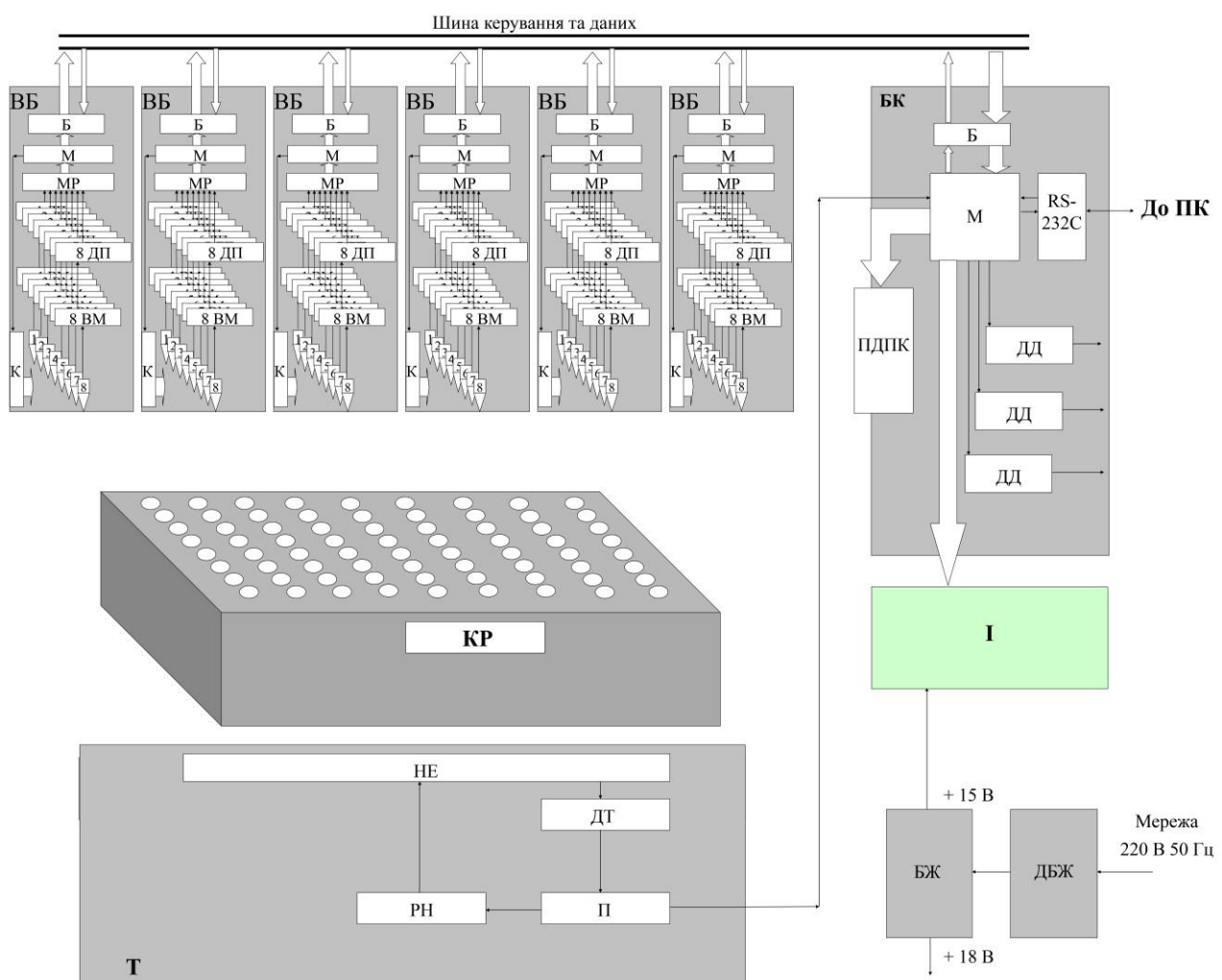


Рис. 2. Функціональна схема приладу, де: ВБ – вимірювальний блок; Б – буфер; М – мікроконтролер; МР – мультиплексор; ДП – диференційний підсилювач; ВМ – вимірювальний модуль; 1...8 – вимірювальні зонди; КР – контейнер; Т – термостат; НЕ – нагрівальний елемент; РН – регулятор напруги; ДТ – датчик температури; П – підсилювач; БК – блок керування; ПДПК – порт датчиків положення контейнера; ДД – драйвер двигуна; І – індикатор; БЖ – блок живлення; ДБЖ – джерело безперебійного живлення; ПК – персональний комп'ютер

Ввімкнення живлення вимірювального мосту здійснюється за сигналом з мікроконтролера на час, який дорівнює постійній часу термістора (6 сек.). Після цього витримується пауза для охолодження термістора (20 сек.). При ввімкненні ключа на вимірювальний міст подається напруга і термістор нагрівається. Тривалості імпульсу достатньо для того, щоб виміряти температуру саморозігріву термістора, на яку впливає ТФХ середовища, що оточує термістор. Поточний процес розігріву термістора протягом тривалості імпульсу заноситься в пам'ять мікроконтролера.

Дані, що одержані в процесі вимірювання, після закінчення сеансу передаються мікроконтролером блоку керування у вигляді файлу даних до ПК.

Контейнер з пробірками розміщується в термостаті приладу для забезпечення постійної температури зразків при проведенні досліджень. Він нагрівається до температури $+40 \pm 0,5$ °С. Потужність нагрівача термостата визначається датчиком температури контейнера за допомогою регулятора напруги. Живлення вузлів приладу забезпечується блоком живлення, який підключений до мережі живлення змінного струму напругою 220 В та частотою 50 Гц через джерело безперебійного живлення.

Поточний стан приладу та температура контейнера з досліджуваними зразками відображається на його індикаторі. Розташування вимірювального модулю та термостата контролюється за допомогою датчиків (кінцевих вимикачів) для унеможливлення механічного пошкодження зондів при переміщенні термостата.

4. 2. Математична модель розповсюдження теплової енергії

Для вимірювання теплопровідності рідин в розробленому приладі застосовуються 60 зондів конічної форми із закріпленими на їх вістрі термісторами.

При саморозігріві термістора електричним імпульсом потік тепла q (рис. 3) розповсюджується в напрямку картриджа термостата через стінки пробірки. На шляху розповсюдження тепла тепловий потік послідовно зустрічає термічний опір [20] оболонки термістора $R_{об.}$, досліджуваної рідини $R_{досл. \text{ рід.}}$, пробірки $R_{проб.}$, повітряного зазору між пробіркою та стінкою лунки картриджу термостата $R_{пов. \text{ заз.}}$ та термічний опір картриджу термостата $R_{картр.}$. Окрім цього, від оболонки термістора відтік тепла буде відбуватися також через тримач термістора в напрямку кріплення термісторного зонду, яке має температуру навколишнього середовища. Термічний опір тримача $R_{трим.}$ визначається за ТФХ матеріалу, з якого він виготовлений, та його розмірами.

Наведені на схемі розповсюдження теплової енергії термічні опори визначаються за формулами:

$$R_{об.} = \frac{1}{k_{об.}} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_{об.}} \cdot \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right) + \frac{1}{\alpha_2 + d_2}, \quad (1)$$

$$R_{досл. \text{ рід.}} = \frac{1}{k_{досл. \text{ рід.}}} = \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2} + \frac{1}{2\lambda_{досл. \text{ рід.}}} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_3}\right) + \frac{1}{\alpha_3 + d_3}, \quad (2)$$

$$R_{проб.} = \frac{1}{k_{проб.}} = \frac{1}{\alpha_3 \cdot d_3} + \frac{1}{2\lambda_{проб.}} \cdot \ln\left(\frac{d_3}{d_4}\right) + \frac{1}{\alpha_4 + d_4}, \quad (3)$$

$$R_{пов.зав.} = \frac{1}{k_{пов.зав.}} = \frac{1}{\alpha_4 \cdot d_4} + \frac{1}{2\lambda_{пов.зав.}} \cdot \ln\left(\frac{d_4}{d_5}\right) + \frac{1}{\alpha_5 + d_5}, \quad (4)$$

$$R_{картр.} = \frac{1}{k_{картр.}} = \frac{1}{\alpha_5 \cdot d_5} + \frac{1}{2\lambda_{картр.}} \cdot \ln\left(\frac{d_5}{d_6}\right) + \frac{1}{\alpha_6 + d_6}, \quad (5)$$

$$R_{трим.} = \frac{1}{k_{трим.}} = \frac{1}{\alpha_7} + \frac{l_{трим.}}{2\lambda_{трим.}} + \frac{1}{\alpha_8}, \quad (6)$$

де $k_{об.}$, $k_{досл. рід.}$, $k_{проб.}$, $k_{пов.зав.}$, $k_{картр.}$, $k_{трим.}$ – теплопровідності оболонки термістора, досліджуваної рідини, пробірки, повітряного зазору між пробіркою та картриджем термостата, картриджа термостата та тримача термістора; $\lambda_{об.}$, $\lambda_{досл. рід.}$, $\lambda_{проб.}$, $\lambda_{пов.зав.}$, $\lambda_{картр.}$, $\lambda_{трим.}$ – коефіцієнти теплопровідності оболонки термістора, дослідної рідини, пробірки, повітряного зазору між пробіркою та картриджем термостата, картриджа термостата та тримача термістора; d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , d_5 , d_6 , – діаметри термістора та оболонки термістора, внутрішній діаметр пробірки, зовнішній діаметр пробірки, діаметр лунки в картриджі термостата та діаметр картриджа термостата; $l_{трим.}$ – довжина тримача.

Коефіцієнт теплопровідності визначається за формулою [21]:

$$\lambda = \frac{P_T}{4\pi r \Delta T}, \quad (7)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваної рідини, Вт/(м·К); P_T – потужність термістора, Вт; r – радіус термістора, м; ΔT – температура розігріву термістора, °С.

Кристал термістора покритий захисною оболонкою переважно із скла або епоксидної смоли. Ці матеріали мають коефіцієнт теплопровідності від 0,3 до 0,5 Вт/(м·К) і тому створюють додатковий тепловий опір на шляху розігріву термістором досліджуваної речовини. Якщо теплопровідність досліджуваної речовини досить мала в порівнянні з теплопровідністю оболонки, то цей фактор майже не впливає на значення температури розігріву термістора. Якщо теплопровідність досліджуваного матеріалу дорівнює або більше теплопровідності оболонки термістора, то це призводить до додаткового саморозігріву термістора.

Температура додаткового саморозігріву термістора при зменшенні теплопровідності досліджуваної рідини знижується.

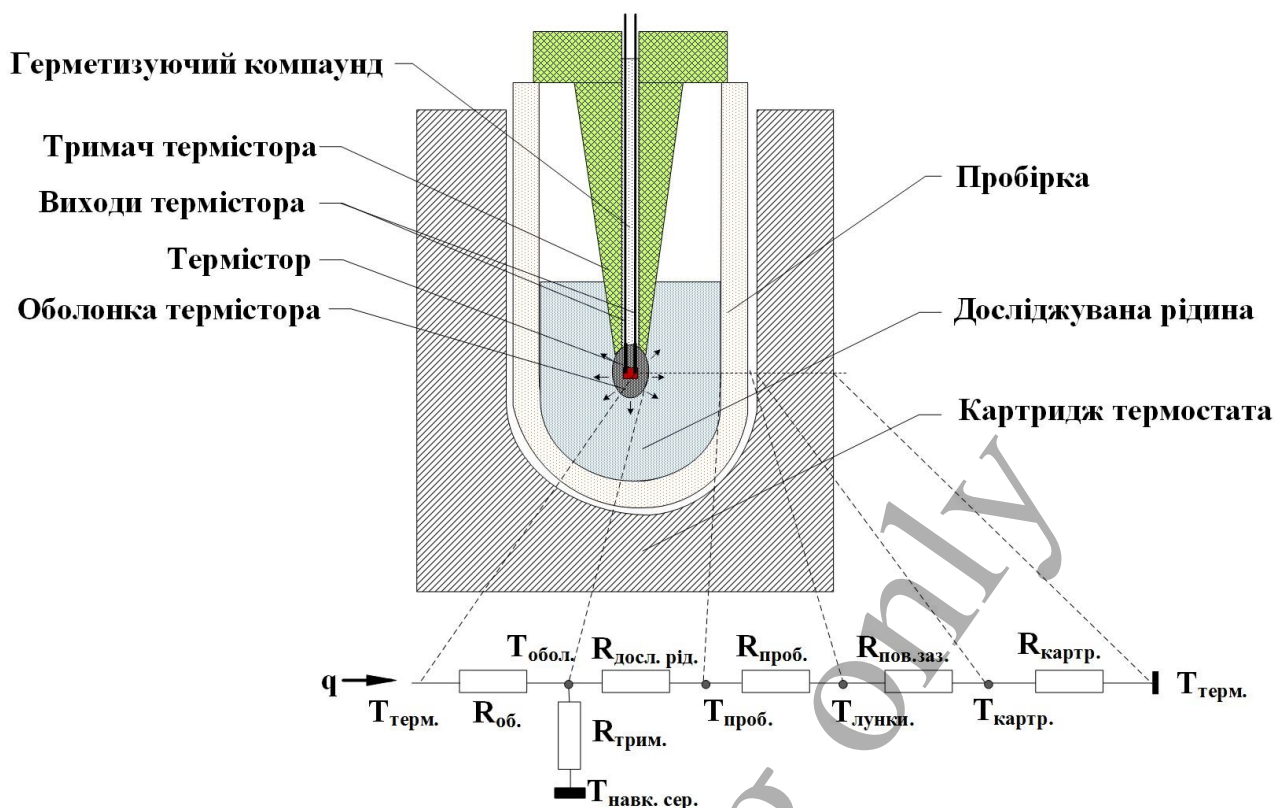


Рис. 3. Схема розповсюдження теплової енергії від термісторного зонду: $R_{об.}$, $R_{досл. рід.}$, $R_{проб.}$, $R_{пов. заз.}$, $R_{картр.}$, $R_{трим.}$ – термічні опори оболонки термістора, досліджуваної рідини, пробірки, повітряного зазору між пробіркою та картриджем термостата, картриджа термостата та тримача термістора, $T_{обол.}$, $T_{лунки.}$, $T_{проб.}$, $T_{терм.}$, $T_{картр.}$ – температура оболонки термістора, досліджуваної рідини, пробірки, повітряного зазору між пробіркою та картриджем термостата, картриджа термостата та тримача термістора, q – напрям теплового потоку

Цей факт обумовлює необхідність введення в розрахункові формули для визначення теплопровідності досліджуваних рідин додаткових коефіцієнтів пропорційності, які визначаються шляхом тестування термісторів з використанням еталонних рідин з відомими ТВХ.

Тому формула для розрахунку коефіцієнта теплопровідності з врахуванням цих обставин набуває вигляду:

$$\lambda_{д.р.} = \frac{P_T}{4\pi r(\Delta T_v - \Delta T_0) * \frac{1}{K_o}}, \quad (8)$$

де $\lambda_{д.р.}$ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваної рідини, Вт/(м·К); P_T – потужність термістора, Вт; r – радіус термістора, м; ΔT_v – температура розігріву термістора, що виміряна дослідною установкою, °С; ΔT_0 – температура саморозігріву термістора, що визначена за результатами тестів з використанням еталонних речовин, °С. Саморозігрів термістора викликаний наявністю оболонки; K_o – коефіцієнт пропорційності, який визначається за результатами тестів з ви-

користанням еталонних рідин. Він характеризує чутливість термісторного зонду до значення теплопровідності досліджуваної рідини, яка його оточує.

Коефіцієнт пропорційності $K_{п.р.}$ визначається за формулою:

$$K_0 = \frac{(\Delta T_{em.2в.} - \Delta T_{em.1в.})}{(\Delta T_{em.2р.} - \Delta T_{em.1р.})}, \quad (9)$$

де $\Delta T_{ет.2 в.}$ та $\Delta T_{ет. 1 в.}$ – значення температури розігріву термістора, що визначені за результатами тестів з використанням еталонних речовин відповідно з найменшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад, 96 % розчин етилового спирту ($\Delta T_{ет.2 в.}$) та найбільшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад, дистильована вода ($\Delta T_{ет. 1 в.}$); $\Delta T_{ет.2 р.}$ та $\Delta T_{ет. 1 р.}$ – значення температури розігріву термістора для еталонних речовин відповідно з найменшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад, 96 % розчин етилового спирту ($\Delta T_{ет.2 в.}$) та найбільшим коефіцієнтом теплопровідності, наприклад, дистильована вода ($\Delta T_{ет. 1 в.}$). Дані величини розраховані за формулою (7), використовуючи значення коефіцієнтів теплопровідності еталонних рідин з матеріалів довідника [22, 23].

Температура саморозігріву термістора ΔT_0 , що викликана наявністю оболонки, визначається за формулою:

$$\Delta T_0 = \Delta T_{em.2в.} - (\Delta T_{em.2в.} - \Delta T_{em.1в.}) \cdot \frac{\Delta T_{em.1р.}}{(\Delta T_{em.2р.} - \Delta T_{em.1р.})}. \quad (10)$$

Загальна температура розігріву термістора визначається за термограмою, що одержана в процесі вимірювання. Числові значення отримані при тестуванні за даними, що представлені в умовних одиницях на виході АЦП приладу. Тому для розрахунків необхідно мати залежність $T=f(N_{АЦП})$ де T – температура термістора, а $N_{АЦП}$ – числове значення на виході АЦП. Оскільки ця залежність нелінійна, то для спрощення розрахунків необхідно провести апроксимацію цієї функції і замінити її на лінійну $T = T_0 + N_{АЦП} K_T$.

Для визначення функції $T=f(N_{АЦП})$ необхідно враховувати електричні характеристики вимірювального каналу приладу, структурна схема якого приведена на рис. 4.

В одне із плечей вимірювального мосту Уінстона ввімкнений термістор. Дослідження теплопровідності рідин проводяться при температурі $+40^\circ\text{C}$. Тому вимірювальний міст складається з трьох резисторів по $1,15 \text{ кОм} \pm 1\%$ (розрахункове значення опору термістора при температурі $+40^\circ\text{C}$ дорівнює $1,15 \text{ кОм}$) і термістора. Напруга в діагоналі моста посилюється підсилювачем і подається через дільник $R_{c1}/(R_{c1}+R_{c2})$ на АЦП. На виході АЦП отримуємо числове значення, що пропорційне напрузі розбалансу моста, яке вимірюється мікроконтролером протягом 6 сек. тривалості імпульсу розігріву і передається в ПК. За одержаною термограмою розігріву термістора (рис. 5) визначається температура розігріву термістора під дією імпульсу струму, як $\Delta N = N_3 - N_1$, де N_3 та N_1 відповідно кінцева та початкова точки термограми розігріву.

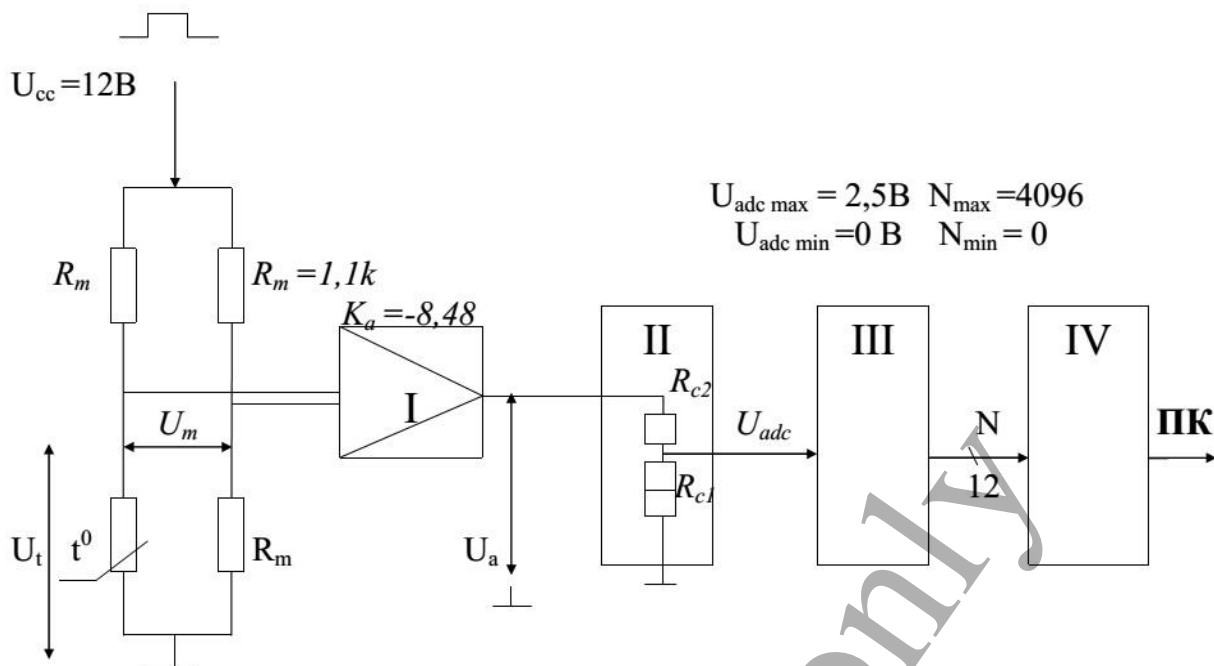


Рис. 4. Структурна схема вимірювального каналу приладу: I – підсилювач, II – дільник, III – АЦП, IV – мікроконтролер

На графіку (рис. 5) точка 1 – початкова точка розігріву термістора (числове значення на виході АЦП – N_1), точка 2 – середина імпульсу розігріву термістора (числове значення на виході АЦП – N_2), точка 3 – кінцева точка розігріву термістора (числове значення на виході АЦП – N_3). Значення N_3 , N_1 – показані на графіку (рис. 5).

Залежність $T=f(N_{\text{АЦП}})$

$$T(N_{\text{АЦП}}) = \frac{1}{\ln \frac{R_M}{R_{25}} \left(\frac{U_i \cdot N_{\text{АЦП max}} \cdot R_{C1} (K_a + 1) - 2N_{\text{АЦП}} \cdot U_{\text{АЦП max}} \cdot (R_{C1} + R_{C2})}{U_i \cdot N_{\text{АЦП max}} \cdot R_{C1} (K_a - 1) - 2N_{\text{АЦП}} \cdot U_{\text{АЦП max}} \cdot (R_{C1} + R_{C2})} \right) - \frac{1}{298,5}} - 273,15, \quad (11)$$

де $N_{\text{АЦП}}$ – отримане числове значення розбалансу вимірювального мосту, у. о.; $U_{\text{АЦП}}$ – напруга на вході АЦП, В; $N_{\text{АЦП max}}$ – максимальне числове значення на виході АЦП, у. о.; $U_{\text{АЦП max}}$ – максимальна напруга на вході АЦП, В; U_i – амплітуда імпульсу, В; K_a – коефіцієнт підсилення підсилювача; R_{C1} і R_{C2} – опори дільника напруги на виході підсилювача відповідно, Ом; R_M – постійні опори вимірювального мосту, Ом; U_a – напруга на виході підсилювача, В; U_m – напруга в діагоналі вимірювального мосту, В; U_T – напруга на термісторі, В; T_{25} – температура +25 °С в °К, при якій нормується опір термістора R_{25} ; R_{25} – опір термістора при температурі 25 °С (характеристика термістора), Ом; B – технологічний коефіцієнт, який залежить від технології виготовлення термістора.

Наведена на рис. 6 залежність є близькою до лінійної. Тому представимо її прямою (пряма $T=T_0+N_{\text{АЦП}} \cdot K_T$, рис. 6), яка проходить через найменше значення діапазону температур (значення на виході АЦП $N=0$) та точку, яка за розрахунками відповідає значенню температури $+40^\circ\text{C}$ (значення N на виході АЦП буде дорівнювати 1394,1).

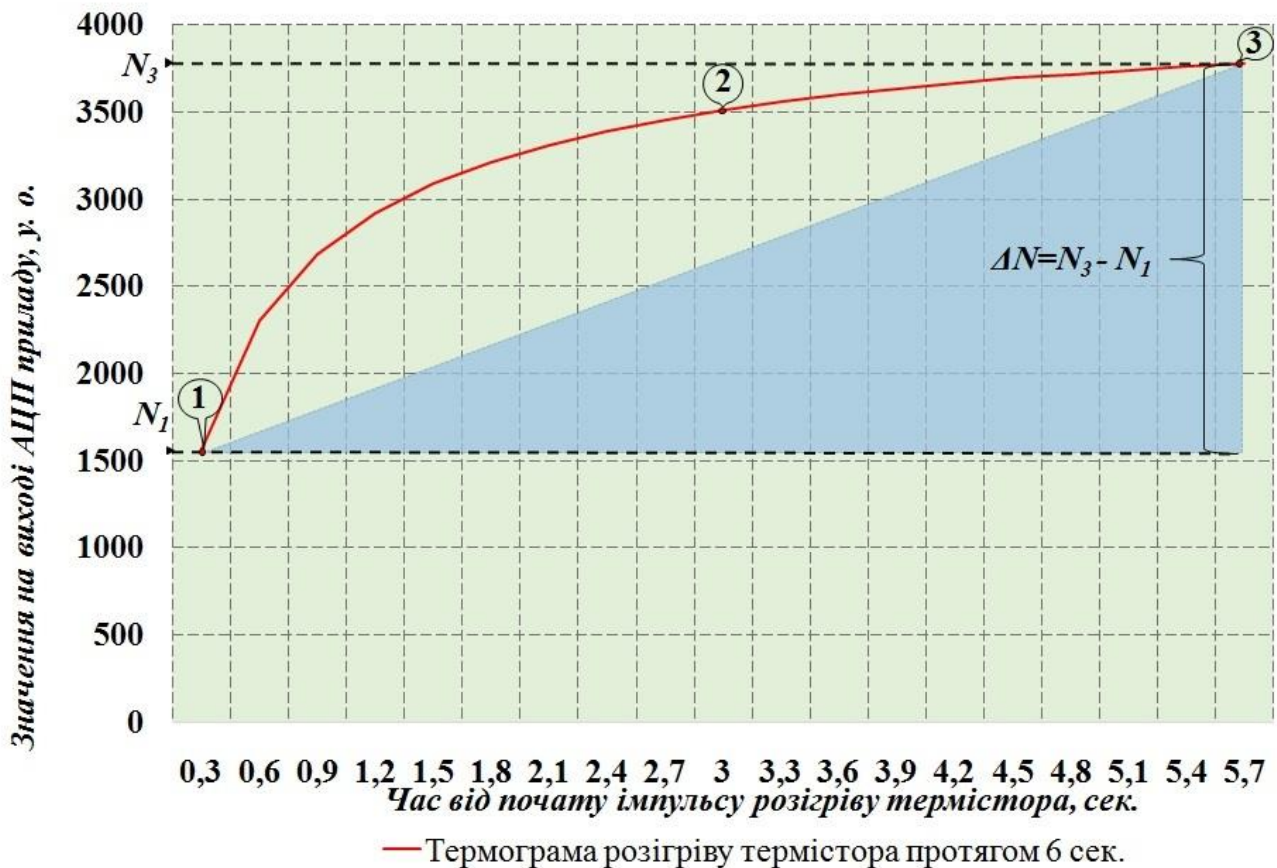


Рис. 5. Термограма розігріву термістора.

Після підстановки в формулу числових значень її складових отримаємо залежність у вигляді кривої $T=f(N)$ (рис. 6).

Для цього при виконанні обчислень коефіцієнта теплопровідності введемо відповідні поправки. Тоді формула (8) прийме наступний вигляд:

$$\lambda_{\text{д.р.і}} = \frac{P_T}{4\pi r \left(\left((N_{3\text{в.і}} - N_{1\text{в.і}}) - (N_{(+40)} - K_{\text{ні}} N_{1\text{в.і}}) \cdot K_{\text{ІІі}} \right) \cdot K_{\text{кі}} \frac{T_{(+40)} - T_0}{N_{(+40)}} - \Delta T_0 \right) \cdot \frac{1}{K_0}}, \quad (12)$$

де $\lambda_{\text{д.р.і}}$ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваної рідини, що визначений за даними вимірювання і-тим термісторним зондом; $N_{3\text{в.і}}$ – числове значення в кінцевій точці розігріву термістора на термограмі, що одержана в результаті вимірювання

i -тим термісторним зондом; $N_{1b\ i}$ – числове значення в початковій точці розігріву термістора на термограмі, що одержана в результаті вимірювання i -тим термісторним зондом; K_{hi} – коефіцієнт, що корегує похибку вимірювання i -тим термісторним зондом температури досліджуваного зразка; K_{Pi} – коефіцієнт, що корегує залежність значення вимірюваної i -тим термісторним зондом різниці $N_{3b\ i} - N_{1b\ i}$ від температури досліджуваного зразка; K_{ki} – коефіцієнт, що корегує чутливість i -го термісторного зонду (здійснює компенсацію похибки значення вимірюваної i -тим термісторним зондом різниці $N_{3b\ i} - N_{1b\ i}$ до середньостатистичного значення); $T_{(+40)}$ – температура термістора, яка дорівнює $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$; T_0 – температура термістора, при якій $N_{\text{АЦП}}=0$; $N_{(+40)}$ – числове значення на виході АЦП при температурі зонда $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, що розраховане при умові лінійної залежності $N=f(T)$.

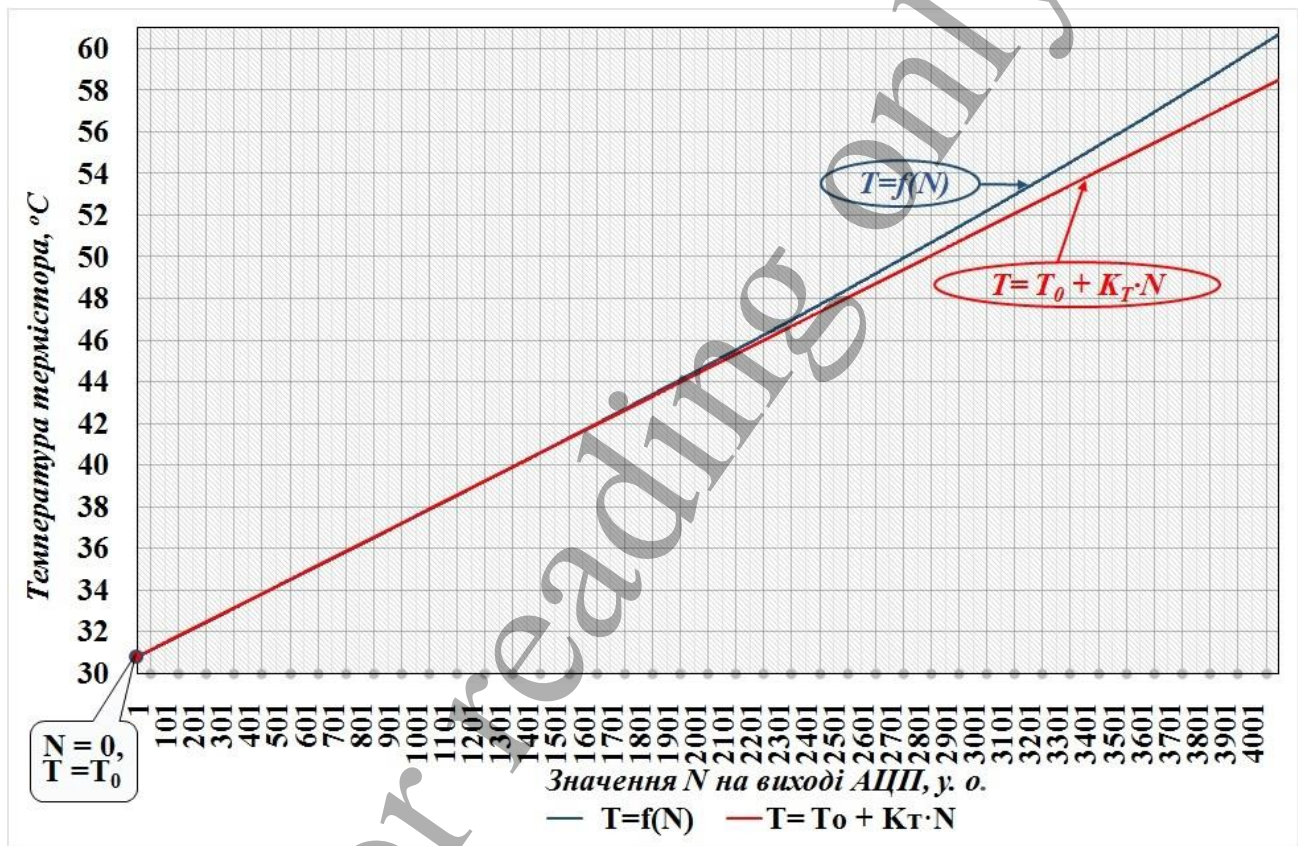


Рис. 6. Залежність температури розігріву термістора від відповідного числового значення на виході АЦП вимірювальної установки

Коефіцієнти K_{hi} , K_{Pi} , K_{ki} визначаються індивідуально для кожного термістора в ході калібрувальних тестувань з використанням в якості досліджуваних еталонних рідин з відомими ТФХ. Ці коефіцієнти є характеристиками термісторного зонда. Коефіцієнти ΔT_0 , K_0 визначаються за даними калібрувальних тестувань з використанням в якості досліджуваних еталонних рідин з відомими ТФХ, але вони є середніми значеннями для всіх зондів.

5. Результати досліджень вимірювання теплопровідності рідин методом прямого підігріву термістора

Для перевірки запропонованого методу визначення теплопровідності рідин та ефективності використання для цього розробленого приладу проведено дослідження наступних рідин [22]:

- дистильована вода;
- фізіологічний розчин (розчин 0,9 % NaCl в дистильованій воді);
- молоко 2,5 % жирності;
- 25 % розчин етилового спирту в дистильованій воді;
- 60 % розчин гліцерину в очищеній воді;
- 80 % розчин гліцерину в очищеній воді;
- 85 % розчин гліцерину в очищеній воді (Розчин нашкірний 85 %, медичний);
- 70 % розчин етилового спирту в воді («Септол»);
- 75 % розчин етилового спирту в воді;
- етиловий спирт медичний 96-Екстра (96 % розчин етилового спирту в воді).

Розрахунок коефіцієнтів теплопровідності досліджуваних рідин проводився за формулою (9). При обчисленнях використовувалися коефіцієнти пропорційності $N_{3\text{в}i}$, $N_{1\text{в}i}$, $K_{\text{ні}}$, $K_{\text{Пі}}$, $K_{\text{кі}}$, що визначені шляхом контрольних вимірювань температури розігріву термісторів в еталонних рідинах з відомими ТФХ. В якості еталонних рідин використовувалися дистильована вода та 96 % розчин етилового спирту в воді. Результати розрахунків по даним вимірювань приведені в табл. 1.

При виконанні розрахунків коефіцієнтів теплопровідності досліджуваних рідин використано середні значення по кожному із зондів за один 10 хвилинний сеанс вимірювання. Щільність розподілу імовірності середніх значень коефіцієнтів теплопровідності різних досліджуваних рідин, що виміряні за один сеанс вимірювань по 10 хвилин кожний, показана на рис. 7. Для визначення похибки вимірювання для кожної із рідин було проведено по 10 сеансів вимірювання і виконано аналіз похибки за кілька сеансів та аналіз похибки при вимірюванні одночасно всіма зондами однієї і тієї ж досліджуваної рідини. Результати аналізу представлено в вигляді графіків на рис. 8. Щільність розподілу імовірності середніх значень за сеанс коефіцієнтів теплопровідності однієї і тієї ж досліджуваної рідини, що визначена за 10 сеансів вимірювань по 10 хвилин кожний, приведена на діаграмі (рис. 9).

За результати вимірювання можна стверджувати, що:

1. Середнє значення похибки вимірювання за один сеанс вимірювання тривалістю 10 хв. різними зондами склало не більше 2 %.

2. Збільшення терміну сеансу вимірювання з наступним усередненням результатів вимірювання збільшує точність вимірювання майже в два рази, але при цьому збільшується і термін проведення досліджень.

3. При вимірюванні одночасно 60 зондами однієї і тієї ж досліджуваної рідини похибка не буде перевищувати 1,5 %.

Таблиця 1

Результати вимірювання коефіцієнта теплопровідності дослідних рідин.

Режим	Значення теплопровідності та величина похибки	Дистильована вода	0,9 % розчин NaCl у воді	Молоко	25 % Розчин етилового спирту у воді	60 % розчин гліцерину у воді	80 % розчин гліцерину	70 % розчин етилового спирту у воді (Септол)	75 % розчин етилового спирту у воді	96 % розчин етилового спирту в воді
1 сеанс 10хв.	Значення, Вт/(м·К)	0,6288	0,6097	0,5632	0,4753	0,4001	0,3428	0,2671	0,2445	0,1741
	Похибка, %	1,09	1,64	1,25	0,92	1,24	1,22	1,23	1,19	1,8
2 сеанси по 10 хв.	Значення, Вт/(м·К)	0,6296	0,6113	0,5632	0,4751	0,3998	0,3428	0,267	0,2444	0,174
	Похибка, %	0,67	1,06	0,9	0,65	0,91	1,05	1,02	0,96	1,47
3 сеанси по 10 хв.	Значення, Вт/(м·К)	0,6295	0,6112	0,5632	0,4752	0,4001	0,3429	0,2672	0,2445	0,174
	Похибка, %	0,58	0,79	0,70	0,60	0,84	0,88	0,93	0,86	1,40
5 сеансів по 10 хв.	Значення, Вт/(м·К)	0,63	0,6109	0,5634	0,4753	0,4002	0,343	0,2672	0,2445	0,1740
	Похибка, %	0,55	0,66	0,58	0,52	0,78	0,74	0,83	0,78	1,25
1 сеанс по 10 хв. (одна рідина)	Значення, Вт/(м·К)	0,6288	0,6097	0,5632	0,4753	0,4001	0,3428	0,2671	0,2445	0,1741
	Похибка, %	0,38	0,4	0,38	0,46	0,48	0,44	0,48	0,65	0,99
Дані з довідників*, Вт/(м·К)		0,628	—	0,564	0,477	0,399	0,336	0,259	0,245	0,175

Примітка: * – табличні дані підготовлені за матеріалами довідника [23]

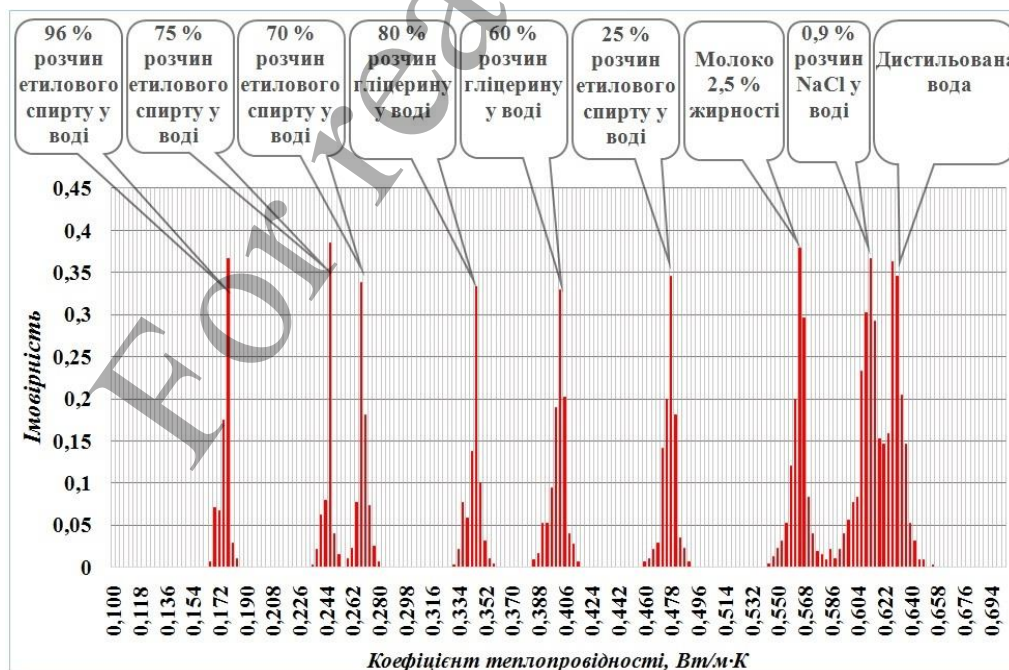


Рис. 7. Щільність розподілу імовірності середніх значень коефіцієнтів теплопровідності різних дослідних рідин, що виміряні за один сеанс по 10 хв. кожний

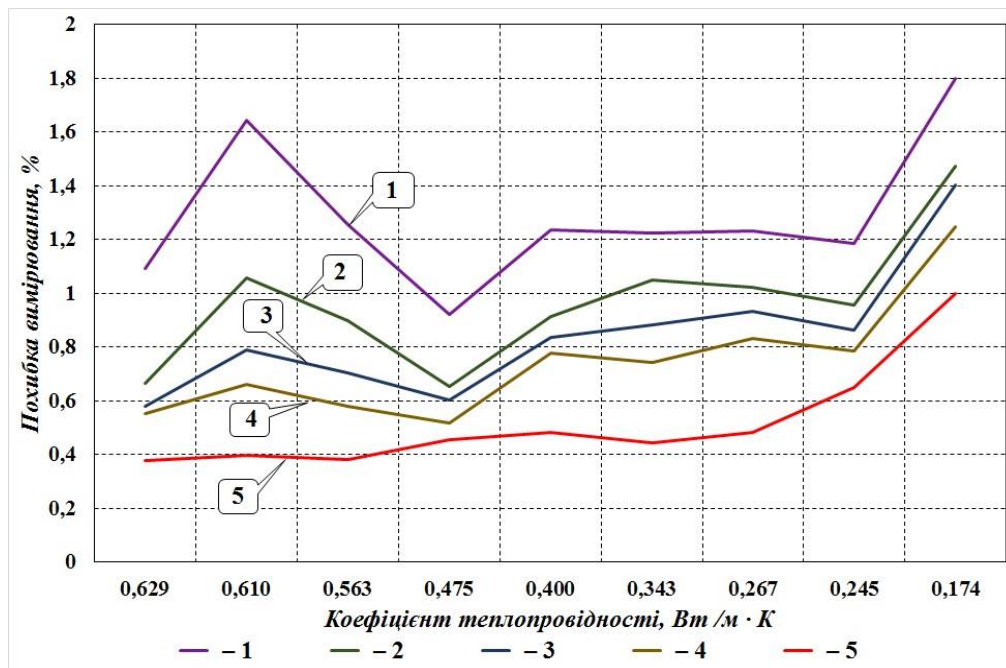


Рис. 8. Похибки вимірювання коефіцієнта теплопровідності за результатами досліджень: 1 – похибка визначення коефіцієнта теплопровідності за один 10 хвилинний сеанс вимірювання; 2 – похибка визначення коефіцієнта теплопровідності за два 10 хвилинних сеанси вимірювання; 3 – похибка визначення коефіцієнта теплопровідності за три 10 хвилинні сеанси вимірювання; 4 – похибка визначення коефіцієнта теплопровідності за п'ять 10 хвилинних сеанси вимірювання; 5 – похибка визначення коефіцієнта теплопровідності за один 10 хвилинний сеанс вимірювання при вимірюванні всіма 60 зондами однієї і тієї ж досліджуваної рідини

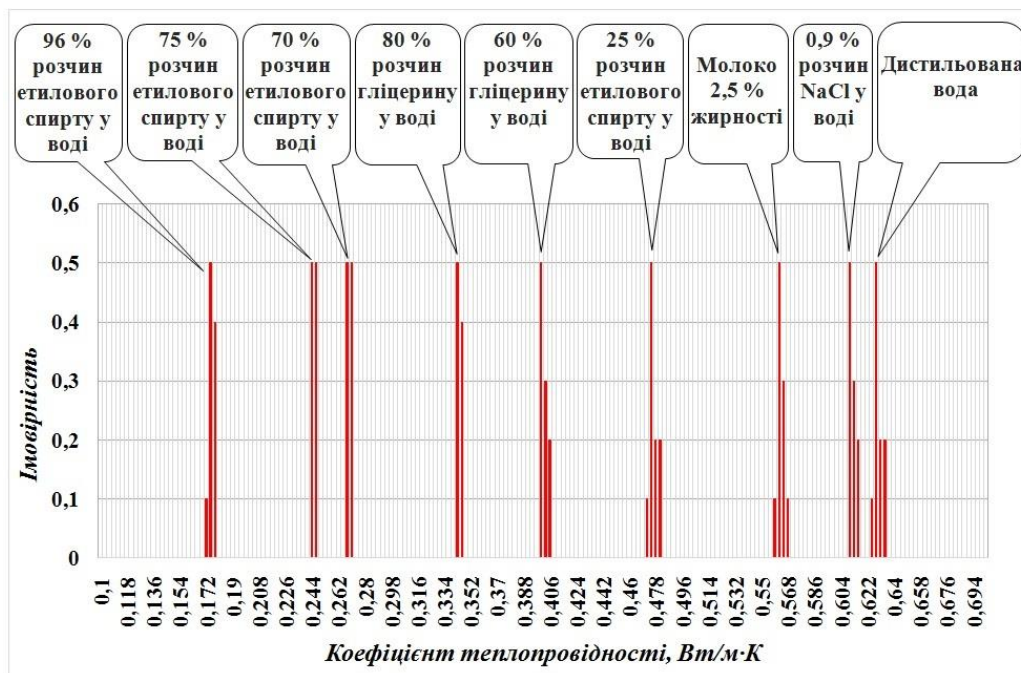


Рис. 9. Щільність розподілу імовірності середніх значень за сеанс коефіцієнтів теплопровідності однієї і тієї ж дослідної рідини, визначена за 10 сеансів вимірювань по 10 хв. кожний

6. Обговорення результатів досліджень можливості підвищення точності вимірювання теплопровідності рідин методом прямого підігріву термістора

Використання розробленого приладу при визначенні теплопровідності досліджуваних рідин дозволив встановити наступні характеристики та особливості його застосування.

1. Діапазон вимірювання термістором температури складає від $+30,5 \pm 1$ °C до $+60,5 \pm 1$ °C. Для зменшення похибки вимірювання необхідно проводити калібрування приладу на еталонних рідинах з визначенням поправочних коефіцієнтів.

2. Час розігріву до досягнення початкової температури $+30,5$ °C складає не більше 30 хв. при температурі навколишнього середовища $+22$ °C. При підвищенні температури навколишнього середовища час розігріву буде скорочуватися, але слід зазначити, що температура навколишнього середовища не має перевищувати $+28,5$ °C. Для прискорення процесу вимірювання доцільно при температурі навколишнього середовища нижче ніж $+22$ °C картридж з досліджуваними речовинами додатково підігрівати в термостаті.

3. Діапазон значень коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{\text{др.і}}$ досліджуваних рідин складає від 0,1 до 1,0 Вт/(м*К) при середньому значенні похибки вимірювання, що не перевищує 2 %.

4. Роздільна здатність приладу складає не менше 3σ , тобто більше 0,03 Вт/(м*К) при значенні теплопровідності 0,6–1,0 Вт/(м*К) та зменшується до значення 0,01 Вт/(м*К) при значенні теплопровідності 0,1–0,2 Вт/(м*К).

5. Встановлено, що похибка приладу при вимірюванні температури розігріву термістора, яка виникає внаслідок дії дестабілізуючих факторів на електронні вузли приладу (імпульсні та флуктуаційні завади), усувається за рахунок введення алгоритму попередньої обробки даних вимірювання.

6. При дослідженні встановлено фактори, що впливають на зонд та зону вимірювання:

- забруднення зонду;
- коливання напруги в мережі живлення приладу;
- поява на поверхні зонду кульок повітря або жирних плям.

Ці фактори, що спричиняють похибки вимірювання, можна усунути. Для цього живлення приладу необхідно здійснювати через високоякісне джерело безперебійного живлення та додатковою очисткою та обезжиренням зонду й змащенням зондів спеціальними речовинами.

7. Зі зменшенням теплопровідності від 1,0 до 0,1 Вт/(м*К) досліджуваної рідини температура саморозігріву термістора збільшується від 12 °C до 20 °C. Збільшення температури саморозігріву термістора пояснюється наявністю у термістора захисної оболонки, матеріал якої має порівняно з досліджуваними рідинами меншу теплопровідність, що змушує вводити в формулу розрахунків додаткові коефіцієнти, які визначаються дослідним шляхом з використанням еталонних рідин з відомими ТФХ.

8. Для вибраного термістора опором 2 кОм достатня амплітуда імпульсу розігріву в вимірювальному мості 12В. Це забезпечить розігрів термістора від 12 °C до 20 °C при коефіцієнті теплопровідності досліджуваної рідини від 1,0 до 0,1 Вт/(м*К).

9. Мінімальна тривалість імпульсу розігріву термістора має дорівнювати постійній часу термістора (для термістора RH16 Mitsubishi – 6 сек.) з паузою охолодження 20 сек. Причому для вирівнювання температури термістора та досліджуваної рідини перші два імпульси не вимірюються, оскільки впродовж їх дії проходить стабілізація теплового режиму в досліджуваній рідині. Таким чином перед вимірюванням термограм температура термістора стабілізується за рахунок дії перших двох імпульсів і подальші вимірювання проходять при постійній температурі. Протягом імпульсу розігріву тривалістю, рівній постійній часу термістора, він нагрівається до 62,9 % максимальної температури його нагріву.

10. Мінімальний об'єм досліджуваної в пробірці діаметром 8 мм – 165 мкл, в пробірці діаметром 10 мм – 380 мкл. При вимірюванні більших об'ємів досліджуваної рідини слід користуватися ємностями відповідних розмірів. Внаслідок переміщення теплих та холодних шарів рідин в ємностях діаметром більше 30 мм вимірювання теплопровідності таким методом є недоцільним.

7. Висновки

1. На основі проведеного аналізу існуючих промислових та лабораторних приладів для визначення теплофізичних характеристик матеріалів встановлено, що вони мають великі похибки вимірювання, які перевищують 3 %, характеризуються великою тривалістю вимірювань, а також відсутні промислові прилади, які здатні за короткий час вимірювати теплофізичні характеристики великої кількості різноманітних матеріалів.

2. Розроблено математичну модель визначення теплопровідності рідин, що заснована на залежності її від температури саморозігріву термістора. При проведенні розрахунку теплопровідності досліджуваної рідини використовуються дані розбалансу вимірювального мосту, що пропорційні температурі розігріву термістора та додаткові коефіцієнти пропорційності, які визначаються шляхом тестування термісторів з використанням еталонних рідин з відомими ТВХ.

3. Створено прилад, в плече мостової схеми якого включено термістор. Він дозволяє виконувати вимірювання коефіцієнтів теплопровідності 60 рідин одночасно в діапазоні їх значень від 0,1 Вт/(мК) до 1,0 Вт/(мК), підвищуючи таким чином продуктивність та точність досліджень.

4. Виконана апробація методу та приладу. Проведені дослідження показали, що значення похибки вимірювання за один сеанс тривалістю 10 хв. різними зондами складало не більше 2 %, тоді як при вимірюванні одночасно 60 зондами однієї і тієї ж дослідної рідини похибка не перевищувала 1,5 %. Використання запропонованого методу прямого підігріву термістора дозволяє використовувати його в різних галузях промисловості, медицині та біології для визначення ТФХ різних матеріалів з високою точністю вимірювань.

Література

1. Жаров, А. В. Экспериментальный метод измерения теплопроводности наножидкости [Текст] / А. В. Жаров, Н. Г. Савинский, А. А. Павлов, А. Н. Евдокимов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8-6. – С. 1345–1350.

2. Куцакова, В. Е. Холодильная технология пищевых продуктов [Текст]: учебник / В. Е. Куцакова, С. В. Фролов, В. И. Филиппов, В. Б. Данин. – СПб.: ГИОРД, 2007. – 224 с.

3. Филиппов, В. И. Применение методов регулярного теплового режима для определения теплофизических характеристик пищевых продуктов [Текст] / В. И. Филиппов // Научн. журн. НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2015. – № 3. – С. 22–30.

4. Патент України № 7178 А. МПК А61В 5/145 (2006.01), А61В 10/00, G01N 33/48 (2006.01), G01N 33/49(2006.01). Пристрій для реєстрації алергічних реакцій [Текст] / Пухлик Б. М., Зайков С. В., Лоянич О. М. – № 94011978; заявл. 31.03.1994; опубл. 30.06.1995, Бюл. № 2. – 2 с.

5. Патент України № 63844 А. МПК А61В 5/00, G01K 7/16 (2006.01), G01N 27/08 (2006.01), G01N 33/48 (2006.01), G01N 33/483 (2006.01), G01N 33/487(2006.01), G01N 33/49 (2006.01), G01N 35/02 (2006.01), G01N 35/10 (2006.01), G05D 23/20 (2006.01), G05D 23/30(2006.01). Пристрій для реєстрації процесів у біологічних пробах [Текст] / Гладких Ю. В., Зайков С. В., Пухлик Б. М., Лоянич О. М., Гладких В. Ю., Лобинцева Г. С. – № 2003098744; заявл. 25.09.2003; опубл. 15.01.2004, Бюл. № 1. – 3 с.

6. Любимова, Д. А. Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом регулярного режима третьего рода [Текст] / Д. А. Любимова, С. В. Пономарев, А. Г. Дивин. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – 79 с.

7. Липаев, А. А. Применение метода периодического нагрева в экспериментальной теплофизике [Текст] / А. А. Липаев // Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ. – Санкт-Петербург: СПбГУ-НиПТ, 2010. – С. 182–195.

8. Ивлиев, А. Д. Применение метода температурных волн для исследования теплофизических свойств конденсированных веществ [Текст] / А. Д. Ивлиев // Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ. – Санкт-Петербург: СПбГУНиПТ, 2010. – С. 65–74.

9. Неразрушающий контроль [Текст]: справочник / ред. В. В. Клюев. – М.: Машиностроение, 2004. – 679 с.

10. Kuttner, H. Microminiaturized thermistor arrays for temperature gradient, flow and perfusion measurements [Text] / H. Kuttner, G. Urban, A. Jachimowicz, F. Kohl, F. Olcaytug, P. Goiser // Sensors and Actuators A: Physical. – 1991. – Vol. 27, Issue 1-3. – P. 641–645. doi: 10.1016/0924-4247(91)87064-a

11. Ould-Lahoucine, C. A method for measuring thermal conductivity of liquids and powders with a thermistor probe [Text] / C. Ould-Lahoucine, H. Sakashita, T. Kumada // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2003. – Vol. 30, Issue 4. – P. 445–454. doi: 10.1016/s0735-1933(03)00073-3

12. Zhang, H. Approaches to extract thermal properties from dual-thermistor heat pulse experimental data [Text] / H. Zhang, L. He, G. Zhao, S. Cheng, D. Gao // Measurement Science and Technology. – 2003. – Vol. 15, Issue 1. – P. 221–226. doi: 10.1088/0957-0233/15/1/031

13. Декуша, Л. В. Влияние определяющих факторов на результаты измерения коэффициентов теплопроводности методом локального теплового воздействия [Текст] / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Т. В. Менделеева, Л. И. Воробьев, О. Л. Декуша // Пром. теплотехника. – 2005. – Т. 27, № 3. – С. 74–79.
14. Чуриков, А. А. Многостадийный метод и информационно-измерительная система неразрушающего контроля теплофизических свойств [Текст] / А. А. Чуриков, А. Ю. Сенкевич // Вестник ТГТУ. – 2002. – Т. 8, № 1. – С. 62–69.
15. Декуша, Л. В. Особенности экспресс-измерения теплопроводности на образце конечной толщины прибором ИТ-8 [Текст] / Л. В. Декуша, Т. В. Менделеева, Л. И. Воробьев, О. Л. Декуша // Промтеплотехника. – 2004. – Т. 26, № 5. – С. 76–81.
16. Зотов, В. Принципы построения систем температурного контроля на NTC-термисторах компании Epcos [Текст] / В. Зотов // Компоненты и технологии. – 2007. – № 71. – С. 32–38.
17. Mitsubishi chip thermistors [Electronic resource]. – Mitsubishi materials. – Available at: <http://www.mmc.co.jp/adv/dev/english/contents/thermistor/>
18. SAW Components [Electronic resource]. – EPCOS AG. – 2002. – Available at: <http://www.mouser.com/ds/2/136/B3574-50177.pdf>
19. Патент на А.С. № 2139528. РФ, МКИ4 G01N25/18. Устройство и способ для измерения теплофизических свойств жидкостей и газов [Текст] / Габитов Ф. Р., Юзмухаметов Ф. Д., Тарзиманов А. А., Зайнуллин И. М., Саттаров И. Р. – № 98100282; заявл. 05.01.1998; опубл. 10.10.1999, Бюл. № 28. – 7 с.
20. Kharalkar, N. M. Pulse-power integrated-decay technique for the measurement of thermal conductivity [Text] / N. M. Kharalkar, L. J. Hayes, J. W. Valvano // Measurement Science and Technology. – 2008. – Vol. 19, Issue 7. – P. 075104. doi: 10.1088/0957-0233/19/7/075104
21. Акуленко, Д. В. Измерение коэффициента теплопроводности среды с использованием термистора прямого подогрева [Текст] / Д. В. Акуленко, А. Н. Агапов, И. Г. Проценко // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития. – 2012. – Вып. III. – С. 49–52.
22. Matvienko, S. Determination thermal and physical characteristics of liquids using pulse heating thermistor method [Text] / S. Matvienko, S. Vysloukh, A. Matvienko, A. Martynchyk // International Journal of Engineering Research & Science. – 2016. – Vol. 2, Issue 5. – P. 250–258.
23. Варгафтик, Н. Б. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов [Текст] / Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филиппов, А. А. Тарзиманов, Е. Е. Тоцкий. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.